

基于北斗卫星导航系统、惯性测量单元和轨道电子地图的有轨电车车载组合定位技术*

陶汉卿^{1,2} 黄 莺^{1**} 蔡 煊³ 侯宇婷³ 廖继轩³

(1. 柳州铁道职业技术学院电子技术学院, 545616, 柳州; 2. 大连交通大学机械工程学院, 116028, 大连;
3. 成都工业学院汽车与交通学院, 611730, 成都//第一作者, 副教授)

摘 要 车辆定位技术是有轨电车运行控制系统的关键技术之一。针对传统 GPS(全球定位系统)定位技术存在的缺点,结合有轨电车的运营特点和定位需求,提出了以 BDS(北斗卫星导航系统)定位为主、以“IMU(惯性测量单元)+轨道电子地图”定位为辅的有轨电车车载组合定位方案。对该组合定位方案进行了仿真测试,结果表明:组合定位系统可以保证有轨电车的精确、连续测速定位,可为有轨电车车辆定位提供了一种低成本、有效的解决方案。

关键词 有轨电车; 车辆定位; 北斗卫星导航系统; 惯性测量单元; 轨道电子地图

中图分类号 U482.19

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.041

Tram On-board Integrated Positioning Technology Based on Beidou Satellite Navigation System, Inertial Measurement Unit and Track Electronic Map

TAO Hanqing, HUANG Ying, CAI Xuan, HOU Yuting, LIAO Jixuan

Abstract Vehicle positioning technology is one of the key technologies of tram operation control system. Targeting the disadvantages of conventional GPS (global positioning system) positioning technology, combining the operating characteristics and positioning needs of trams, a tram on-board integrated positioning scheme based on BDS (Beidou satellite navigation system) positioning and supplemented by 'IMU (inertial measurement unit) + Track Electronic Map' positioning is proposed. Simulation test is carried out on the integrated positioning scheme. Results show that the integrated positioning system can ensure the accurate and continuous speed measurement and

positioning of the tram, providing a low-cost and effective solution for tram vehicle positioning.

Key words tram; vehicle positioning; Beidou navigation satellite system; inertial measurement unit; track electronic map

First-author's address School of Electronic Engineering, Liuzhou Railway Vocational Technical College, 545616, Liuzhou, China

相比于大运量城市轨道交通,有轨电车具有建设周期短、运能适中、工程造价低、适合大坡度和小曲线半径运行等优点^[1]。车辆定位技术是有轨电车信号控制系统的关键技术之一,可对车辆进行精确、连续定位,以有效保障有轨电车的运行安全和运输效率。文献[2]对目前有轨电车系统中“计轴+感应环线+信标”等常用的车辆组合定位方案进行了适用性分析。文献[3]采用 GPS(全球定位系统)、INS(惯性导航系统)、里程计及地面应答器构建了有轨电车组合定位系统,此种组合定位方式在高速铁路的列车定位研究中已比较常见,其定位传感器的种类较多,建设成本较高。文献[4]提出了一种基于 GPS、INS 和轨间感应环线的有轨电车组合定位方案,该方案同样存在地面辅助定位设备较多、建设成本较高等问题。针对有轨电车的运营环境和定位需求,本文采用 BDS(北斗卫星导航系统)、IMU(惯性测量单元)及轨道电子地图构建一种低成本的有轨电车车载组合定位系统,将车辆定位功能完全建立在车载环境中,最后通过仿真测试

* 2021 年广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY1384);广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人[2018]35号);广西职业教育第一批专业发展研究基地项目(桂教职成[2018]37号);成都工业学院博士基金项目(2019RC014);成都工业学院校级科研项目(2020ZR018)

** 通信作者

验证该系统的有效性。

1 有轨电车的定位需求分析

有轨电车具有以下特征:通常采用低地板车辆,其地板距地面高度一般为 300 ~ 350 mm;运行速度较低、追踪间隔较大;建设周期短、建设成本低;与社会车辆混行路段,路权相对开放等^[5-6]。由此,有轨电车的定位需求如下:

1) 相较于干线铁路、地铁,有轨电车的定位精度要求较低。有轨电车大多采用司机目视行车人工驾驶模式,不具备 ATO(列车自动运行)功能,因此对列车定位参数(如速度、位置等)的精度和实时性要求相对不是很高。

2) 相较于干线铁路、地铁,有轨电车的定位安全性和可靠性要求较低。有轨电车的车载和轨旁设备相对简单,不具备完整的 ATP(列车自动防护)功能,通常只要求具备闯红灯和超速报警等基本功能。

3) 有轨电车的车载及轨旁定位设备安装空间受限较大。有轨电车一般采用低地板车辆,要在车底安装地面信标系统的车载配套设备(即车载信标接收模块)难度较大;另外,在有轨电车与社会车辆共用路权区段,有轨电车的地面定位设备需埋入地表以下,不得影响社会车辆及行人的正常通行。

4) 有轨电车的建设成本通常只有地铁的 1/5 ~ 1/3,相对苛刻的总体建设成本要求有轨电车选用更加简单实用、低成本的车辆定位设备。

2 有轨电车的组合定位方案

2.1 基于 BDS 的有轨电车定位

基于 GNSS(全球导航卫星系统)的列车定位技术是目前城市轨道交通列车定位的研究热点和发展趋势。GNSS 可为列车提供较为精确的绝对位置信息和速度信息,且其定位误差不累积,可为有轨电车定位提供一种低成本、高效的解决方案。但由于有轨电车在城市环境中的运行复杂性,其卫星信号容易被高楼、立交桥等建筑物遮挡,导致车载卫星接收机的定位精度很差甚至短时失效,为保证有轨电车定位的连续性和完整性,还需利用其他类型的定位传感器为其提供辅助的定位信息。GPS 作为最为成熟的 GNSS 技术,针对其在有轨电车定位中的应用研究已有很多,但基于我国自主研发的

BDS 的有轨电车定位技术的相关研究目前还很少,为此,对 BDS 在我国诸如轨道交通、通信、国防等关键领域中的应用展开研究,具有重要的战略意义。

伪距定位法是 BDS 在运动载体定位中最为常用的方法^[7],其将北斗卫星捕获的伪随机码进行数学运算,获取导航信号从卫星发送到接收机接收所需的传输时间,利用该时间乘以电磁波的传播速度就能得到北斗接收机与北斗卫星之间的距离。由于接收机时钟、卫星时钟与 BDS 标准原子时钟之间均存在误差,因此该距离称为伪距。基于 BDS 的有轨电车定位原理如图 1 所示,卫星时钟与 BDS 标准原子时钟的时间差可由北斗地面控制站测出,并发送给北斗接收机进行误差修正;将接收机时钟与 BDS 标准原子时钟的时间差作为 1 个未知参数,与有轨电车三维位置坐标一起求解。

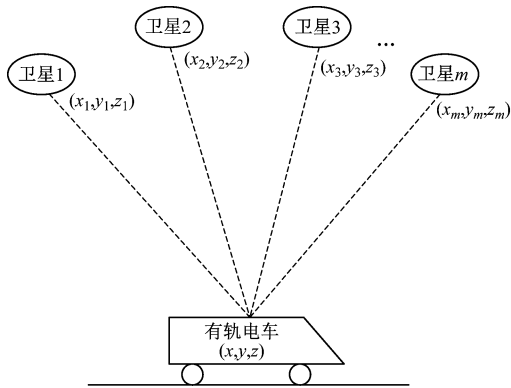


图 1 基于 BDS 的有轨电车定位原理

Fig. 1 Tram positioning principle based on BDS

基于伪距定位法,利用车载北斗接收机实时接收有轨电车所处地域上空的北斗卫星播发的星历数据,即可计算得到有轨电车的三维位置坐标信息(经度、纬度、高度),其计算式如下:

$$\rho_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + c\Delta t \tag{1}$$

式中:

ρ_i ——第 i 颗北斗导航卫星到北斗接收机(即有轨电车)的伪距;

(x_i, y_i, z_i) ——第 i 颗北斗卫星的三维空间位置坐标,可通过卫星播发的星历数据获取;

(x, y, z) ——待求解的北斗接收机的三维位置坐标;

c ——电磁波在空气中的传播速度(即光速);

Δt ——接收机时钟与北斗系统标准原子时钟的

时间差;
 i ——自然数序列。

除了绝对位置坐标,北斗接收机还能实时解算出有轨电车的三维速度等定位参数。造成北斗系统测速定位误差的主要因素有卫星轨道误差、多路径效应、电离层延迟、对流层延迟等,可采用北斗伪距差分定位方式削弱或消除上述误差。考虑到有轨电车大多作为地铁系统的延伸和补充,其运营范围并不太大,因此可选择在其始发站和终到站设置北斗差分基站即可,如图2所示。

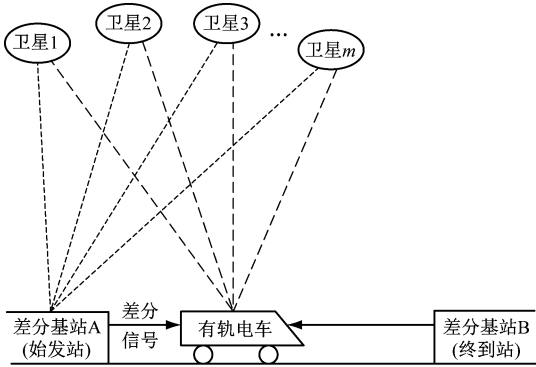


图2 在有轨电车上设置北斗差分基站
Fig. 2 Setting up Beidou differential base station on tram line

2.2 基于“IMU + 轨道电子地图”的有轨电车定位

2.2.1 基于IMU的有轨电车定位原理

由BDS定位原理可知,卫星定位是一种典型的低频绝对定位方式,可以确定有轨电车的绝对位置,且定位误差无累积特性。但由于受建筑物遮挡等因素的影响,卫星定位系统无法保证提供连续不间断的定位信息,因此,在有轨电车实际定位过程中,必须引入辅助的高频相对定位方式(如里程计、多普勒雷达、惯性导航系统等),用以对卫星定位信息进行有效补充,从而保证有轨电车定位的连续性和完整性。

与道路交通等其他交通方式不同,轨道交通车辆的运行轨迹受轨道线路的约束。为保证有轨电车运行的安全性和平稳性,有轨电车的轨道线路一般为长直线及小部分曲线线路。因此,可近似认为有轨电车的运行轨迹处于二维平面内,忽略有轨电车的垂直于地面方向的速度及车辆的俯仰、横滚等姿态变化。基于有轨电车上述运行特征,可对传统的应用于运动载体导航定位的惯性导航系统进行简化,采用单轴加速度计和单轴角速率陀螺仪构成

IMU,用以对有轨电车进行测速定位,以达到降低系统成本、减少计算量的目的。简化后的有轨电车惯性定位原理如图3所示^[8]。图3中,下角标 n 、 b 分别表示二维平面坐标轴的导航坐标系和载体坐标系; k 表示第 k 时刻, φ_k 表示有轨电车的实时航向角, (x_k, y_k) 为有轨电车的实时位置。

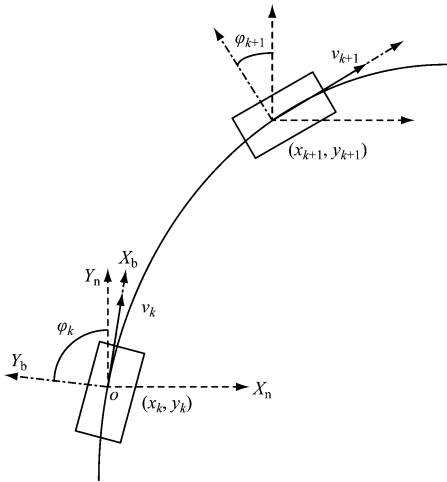


图3 基于IMU的有轨电车定位原理
Fig. 3 Tram positioning principle based on IMU

从IMU的测速定位原理可以看出,基于IMU的有轨电车定位法是一种典型的航迹推算定位法,具有计算量少、自主性高、短时定位精度高等优点,但其位置信息来自加速度的二次积分,误差具有累积特性,不适合用于有轨电车的长时间单独定位,需利用其他手段来校正IMU的累积定位误差。

2.2.2 轨道电子地图地理特征信息数据库

目前,匹配轨道电子地图是已配备卫星导航、惯性导航等前沿定位技术的轨道交通车辆的有效辅助定位手段^[9]。由于轨道线路含有坡道、曲线等特征点,通过测绘等手段可预先采集曲率信息等轨道线路特征参数,进而建立完整的绝对公里标与轨道特征参数逐一对应的轨道电子地图地理特征信息数据库。但是,仅仅依靠轨道电子地图的匹配定位无法实现完整的有轨电车定位功能,该方法通常作为其他定位技术的辅助手段。从上文IMU定位原理可知,轨道电子地图可作为IMU定位的有效辅助手段。

2.2.3 基于“IMU + 轨道电子地图”的有轨电车定位技术

基于“IMU + 轨道电子地图”的有轨电车定位技术,其原理如图4所示。当BDS发生短时失效

时,将最后 1 个北斗有效定位结果作为 IMU 的初始位置基准,利用 IMU 持续推算有轨电车的速度和位置信息,保证有轨电车定位的连续性和可用性;同时,提取轨道电子地图中存储的坡度、线路曲率等轨道特征参数,与 IMU 测量的相应数据进行比对和匹配,即可确定有轨电车在轨道线路中的正确位置,从而对 IMU 的定位累积误差进行校正。

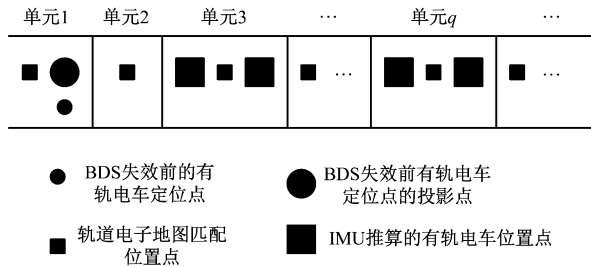


图4 基于“IMU+轨道电子地图”的有轨电车定位原理

Fig. 4 Tram positioning principle based on 'IMU + track electronic map'

2.3 有轨电车的车载组合定位系统

通过以上分析,本文将 BDS、IMU、轨道电子地图 3 种定位技术进行组合,构建有轨电车的车载组合定位系统。该车载组合定位将有轨电车定位功能完全建立在车载环境中,以显著的低成本实现有轨电车的定位需求。如图 5 所示,该系统以 BDS 为主,利用 BDS 为有轨电车提供近似连续的位置、速度信息,以“IMU + 轨道电子地图”定位为辅,当 BDS 失效时可保证车辆定位的连续性和可用性。

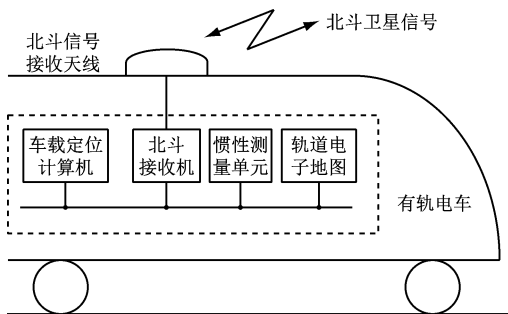


图5 有轨电车的车载组合定位系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tram on-board integrated positioning system structure

3 有轨电车车载组合定位系统有效性的仿真验证

为检验本文构建的有轨电车车载组合定位系统的定位性能,在实验室环境下搭建的仿真测试平

台上进行仿真验证。仿真测试平台结构如图 6 所示。

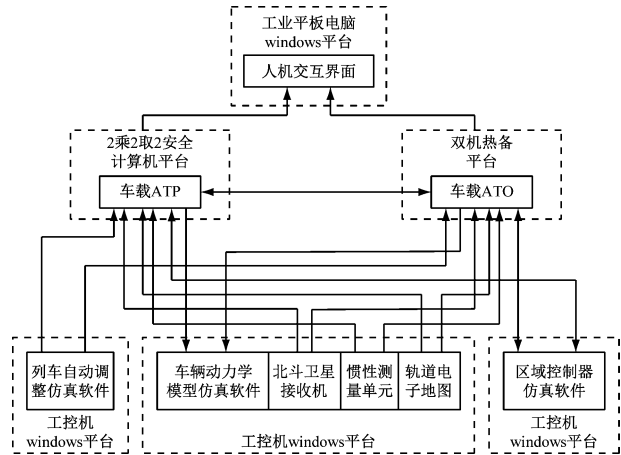


图6 有轨电车载组合定位系统的仿真测试平台

Fig. 6 Simulation test platform of tram on-board integrated positioning system

本文对有轨电车的仿真参数进行如下设定:①初始位置为北纬 $23^{\circ}54'$ 、东经 $108^{\circ}32'$;②初始速度为 40 km/h ,向正东方向运行;③加速度计随机游走 $10^{-4} g/\sqrt{t_1}$ (t_1 为加速度计随机游走时间,单位为 s ; g 为重力加速度),常值误差为 $10^{-3} g$;④陀螺仪随机游走 $0.01^{\circ}/\sqrt{t_2}$ (t_2 为陀螺仪随机游走时间,单位为 h),常值漂移为 $0.05^{\circ}/h$;⑤IMU 的初始航向角误差为 0.5° ,初始速度误差为 0.2 m/s ,初始位置误差为 10 m ;⑥BDS 的速度误差均方根为 0.1 m/s ,水平位置误差均方根为 5 m ;⑦IMU 的采样周期为 0.01 s ,BDS 的采样周期为 1.00 s ,车载定位计算机的处理周期为 1.00 s 。

以高精度的北斗伪距差分定位结果作为基准值,对 BDS 定位、“IMU + 轨道电子地图”定位和组合定位 3 种定位模式进行仿真,得到的里程误差和速度误差结果分别如图 7、图 8 所示。

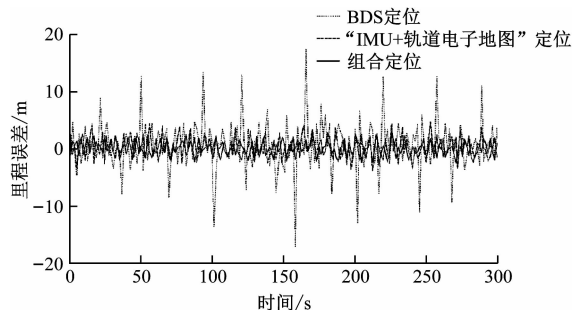


图7 里程误差仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of mileage error simulation results

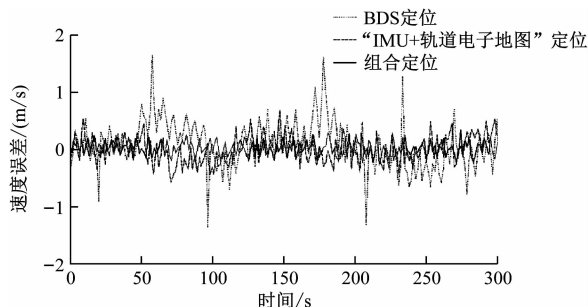


图8 速度误差仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of speed error simulation results

由图7可看出,在BDS定位模式下,由于BDS自身存在的缺陷,里程误差较大;在“IMU+轨道电子地图”定位模式下,轨道电子地图有效校正了IMU的里程累积误差。相比于BDS定位,“IMU+轨道电子地图”定位的里程误差总体上有所减小,但仍然不平稳;在组合定位模式下,里程误差平稳且收敛,表明本文构建的有轨电车车载组合定位系统是有效的,能够克服各定位传感器单独定位的功能缺陷,保证了有轨电车定位的精确性和连续性。

同样,由图8可看出,在BDS定位模式下,由于受到各种误差因素的影响,速度误差较大;相比于BDS定位,由于IMU的高自主性和短时高精度特性,“IMU+轨道电子地图”定位的速度误差总体上有所减小;在组合定位模式下,速度误差同样平稳且收敛,表明本文构建的有轨电车车载组合定位系统能够克服各定位传感器单独定位的功能缺陷,保证了有轨电车测速的精确性和连续性。

4 结语

本文针对有轨电车的运营特点和具体定位需求,构建了一种结合了北斗卫星接收机、惯性测量单元及轨道电子地图3种定位技术的车载组合定位系统,并通过仿真测试验证了该系统的有效性,为有轨电车定位提供了一种低成本、有效的解决方案。因受客观条件的限制,在实验室环境下进行的仿真验证并不能完全真实地反映有轨电车的运行条件和运行状态,因此,下一步的研究重点是寻求搭建真实的车载试验环境,进一步分析影响有轨电车定位的实际因素。

参考文献

- [1] 霍凯宇. 现代有轨电车项目建设可行性及技术方案研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
HUO Kaiyu. Study of the construction feasibility and technical proposal of modern tram[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2014.
- [2] 李鸿旭,喻智宏,刘圣革. 现代有轨电车智能控制系统中的车辆定位技术方案[J]. 都市快轨交通,2013(6):160.
LI Hongxu, YU Zhihong, LIU Shengge. Vehicle positioning technology solutions in modern trams' intelligent control system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013(6):160.
- [3] 沈兴涛. 现代有轨电车载组合定位系统[D]. 兰州:兰州交通大学,2014.
SHEN Xintao. Integrated positioning system of modern tram[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [4] 闫利栋. 现代有轨电车载组合定位关键技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
YAN Lidong. Key technology research on integrated positioning of modern tram[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [5] 苗彦英. 低地板有轨电车车辆技术特征[J]. 城市交通,2013(4):39.
MIAO Yanying. Technologies for low-floor streetcar development [J]. Urban Transport of China, 2013(4):39.
- [6] 孙吉良. 现代有轨电车信号系统及技术关键的研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2013(4):55.
SUN Jiliang. Research on the key technology and signaling system of modern tram[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2013(4):55.
- [7] 戴连君. 基于北斗卫星系统的列车定位方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
DAI Lianjun. Study on train positioning methods based on Beidou satellite system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [8] 刘江,蔡伯根,唐涛,等. 低成本列车组合定位系统容错算法设计[J]. 铁道学报,2011(1):39.
LIU Jiang, CAI Baigen, TANG Tao, et al. Fault-tolerant algorithm design of low-cost integrated train positioning system[J]. Journal of the China Railway Society, 2011(1):39.
- [9] 上官伟,袁重阳,蔡伯根,等. 北斗二代在西部低密度铁路中的应用[J]. 交通运输工程学报,2016(5):132.
SHANGGUAN Wei, YUAN Chongyang, CAI Baigen, et al. Application of BDS in western low-density railway lines[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016(5):132.

(收稿日期:2020-02-21)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821